

# Research on the construction and application of ammonia mixed combustion test bench

Fengtao Wang

1. Xinjiang Railway Vocational and Technical College, Hami, Xinjiang, 839000, China

## Abstract

Ammonia ( $\text{NH}_3$ ) has important potential as a zero-carbon fuel in the energy transition, but its combustion characteristics are complex, and there are problems such as difficult ignition, slow flame propagation, and high nitrogen oxide ( $\text{NO}_x$ ) emissions. In this paper, a set of miniaturized ammonia-doped mixed combustion test benches was designed and built, and the mixed combustion characteristics of ammonia, hydrogen, methanol and other fuels were studied through modular design, domestic equipment substitution and intelligent data acquisition system integration. The total cost of the laboratory bench is controlled at 100,000 yuan, with 10Hz real-time data collection capabilities,  $\text{NO}_x$  detection accuracy of  $\pm 5\%$ , and the flame temperature measurement range covers 400~1800 °C.

## Keywords

ammonia-doped combustion, test bench construction, low-cost exploration

# 掺氨混合燃烧实验台搭建及应用研究

王峰涛

1. 新疆铁道职业技术学院, 中国·新疆 哈密 839000

## 摘 要

氨 ( $\text{NH}_3$ ) 作为一种零碳燃料, 在能源转型中具有重要潜力, 但其燃烧特性复杂, 存在点火困难、火焰传播速度慢及氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ ) 排放高等问题。本文设计并搭建了一套小型化掺氨混合燃烧实验台, 通过模块化设计、国产设备替代及智能数据采集系统集成, 实现了氨与氢气、甲醇等燃料的混合燃烧特性研究。现有掺氨燃烧实验室投入大占地广, 每次实验成本高, 不利于日常实验和教学, 实验台总成本控制在10万元, 具备10Hz级实时数据采集能力,  $\text{NO}_x$ 检测精度达 $\pm 5\%$ , 火焰温度测量范围覆盖400~1800°C。

## 关键词

掺氨燃烧, 试验台搭建, 低成本探索

## 1 引言

### 1.1 研究背景

全球气候变化背景下, 碳中和目标的推进促使清洁能源技术快速发展。氨因其高能量密度 (18.6 MJ/kg)、无碳特性及成熟的储运技术, 被视为替代化石燃料的重要选择。

然而, 纯氨燃烧存在以下挑战:

点火困难: 氨的着火温度高达 651°C, 需借助辅助燃料 (如氢气) 降低点火能量;

火焰传播速度低: 纯氨层流燃烧速度仅约 7 cm/s ( $\Phi=1.0$ ), 远低于甲烷 (38 cm/s);

$\text{NO}_x$  排放高: 燃烧过程中燃料氮转化为  $\text{NO}_x$  的比例可达 10%~30%。

针对上述问题, 掺混氢气、甲醇等燃料可有效改善燃烧性能, 但需通过实验研究优化混合比例与工况参数。传统燃烧实验装置多依赖进口设备 (如德国 ITHACON 系统),

成本高昂 (超 50 万元), 且体积庞大, 难以在中小型实验室推广。因此, 开发低成本、小型化实验台具有迫切需求。

### 1.2 研究目标与创新点

本研究目标为:

设计模块化掺氨燃烧实验台, 支持氨 / 氢 / 甲醇多燃料混合燃烧;

集成国产传感器与数据采集系统, 总成本压缩至 10 万元级;

揭示混合燃料燃烧稳定性与污染物生成规律。

创新点包括:

采用静态混合腔与多孔介质喷嘴, 提升燃料混合均匀性;

基于 Python 开发智能数据采集平台, 支持实时报警与远程控制;

国产电化学传感器替代进口光谱仪, 成本降低 80%。

## 2 实验装置设计与搭建

### 2.1 系统总体架构

实验台由燃料供给、燃烧反应、排放监测、安全控制及数据采集五大子系统构成,整体尺寸为 $1.8\text{m}\times 1.5\text{m}$ ,采用模块化设计。燃料供给系统通过质量流量控制器(MFC)和蠕动泵精确控制氨气、氢气及甲醇的流量;燃烧反应系统包含耐高温燃烧室、点火装置及温度监测模块;排放监测系统集成 $\text{NO}_x$ 、 $\text{NH}_3$ 及颗粒物检测设备;安全控制系统通过泄漏传感器与紧急切断阀实现风险防控;数据采集系统基于研华DAQ模块与信捷PLC实现多参数同步记录与分析。

### 2.2 燃料供给系统

#### 2.2.1 燃料输送与控制

氨气与氢气:采用国产质量流量控制器(七星华创D07系列和成都松盛CS-FLOW100)分别调控流量,氨气量程为 $0\sim 50\text{SLM}$ ,氢气量程为 $0\sim 20\text{SLM}$ ,精度均为 $\pm 1.5\%$ 。

甲醇:通过兰格BT100S蠕动泵输送液态甲醇(流量范围 $0.1\sim 100\text{mL/min}$ ),经JYQ-200型电加热汽化器(功率 $500\text{W}$ )转化为气态后进入混合腔。

#### 2.2.2 混合腔设计

混合腔由不锈钢材质制成,内部集成特氟龙静态混合器。混合器采用多级螺旋叶片结构,通过增强湍流实现燃料均匀混合。腔体耐压 $0.6\text{MPa}$ ,出口直径为 $10\text{mm}$ ,确保燃料在进入燃烧室前充分混合<sup>[1]</sup>。

### 2.3 燃烧反应系统

#### 2.3.1 燃烧室结构

燃烧室主体采用310S不锈钢(尺寸 $\Phi 80\times 200\text{mm}$ ),耐温 $1200^\circ\text{C}$ 。前端配置多孔介质喷嘴(孔径 $1\text{mm}$ ,孔隙率 $60\%$ ),通过增强湍流缩短火焰驻留时间。燃烧室顶部设置石英玻璃视窗(直径 $50\text{mm}$ ,耐温 $800^\circ\text{C}$ ),用于观测火焰形态。

#### 2.3.2 点火与测温

点火装置:采用国产HGT-01型高压火花塞,点火频率 $1\sim 10\text{Hz}$ 可调,陶瓷护套耐温 $1500^\circ\text{C}$ ;

温度监测:沿燃烧室轴向布置3支K型热电偶(Inconel护套,精度 $\pm 1\%$ ),同步使用海康威视HT-30红外测温仪(响应时间 $1\text{ms}$ )捕捉火焰瞬态温度。

实验台原理简图如图1所示。

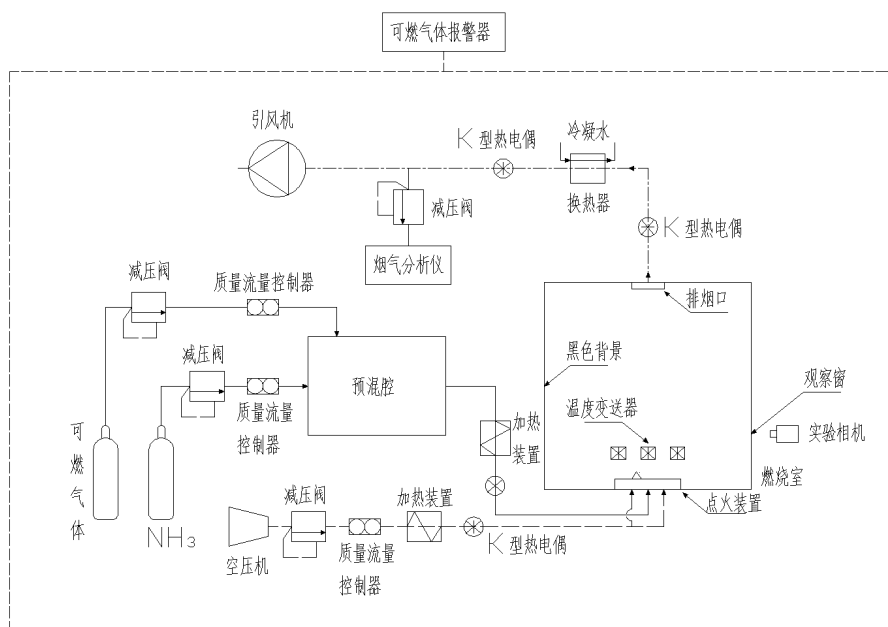


图1 实验台原理简图

试验台主要设备有:

质量流量控制器3个:分别用来监测可燃气体流量、氨气流量、空气流量,用以调定掺氨比例和燃烧时不同空气比例,是研究不同比例下的掺氨实验的重要计量工具。

烟气分析仪1个:用以分析燃烧后产物含量变化,需能检测氮氧化物含量,碳氧化物含量,氧气等气体含量。

K型热电偶4个:分别用来测量输入空气温度、掺氨可燃气体加热后温度、燃烧产物温度、冷却后温度,用以确定掺氨比例和预热温度之间的变化关系以及确保燃烧尾气

温度在烟气分析仪接受范围内。

减压阀4个:用以控制气体流量,改变掺氨比例和燃烧情况。

管型加热装置2个:用以对空气以及掺氨气体进行预热,降低燃烧难度。

实验相机1个:按一定间隔时间记录氨燃烧情况及火焰状态。

可燃气体报警器:检测是否有可燃气体泄漏情况,便于对泄漏等突发情况进行及时处置。

## 2.4 排放监测系统

### 2.4.1 污染物检测

NO<sub>x</sub> 与 NH<sub>3</sub>: 采用雷磁 DDBJ-350F 便携式检测仪, NO<sub>x</sub> 检测范围为 0~1000ppm, NH<sub>3</sub> 检测范围为 0~200ppm, 精度均为  $\pm 5\%$ 。采样管路配备加热硅胶管(耐温 200℃)及陶瓷滤芯(过滤精度 0.5 $\mu$ m), 以去除颗粒物干扰。

颗粒物(PM<sub>2.5</sub>): 通过滤膜称重法评估排放水平, 使用国产分析天平(精度 0.1mg)称量滤膜质量变化。

### 2.4.2 校准与维护

传感器校准: 每周使用标准气体(NO<sub>x</sub> 100ppm、NH<sub>3</sub> 50ppm)进行两点校准, 确保检测精度;

滤膜预处理: 滤膜在恒温恒湿箱(25℃, 50%RH)中平衡 24 小时后称重, 减少环境湿度影响。

## 2.5 安全控制系统

泄漏监测: 在燃料管路关键位置安装 3 个海康威视 HK-AM 氨气传感器(量程 0~100ppm)和 2 个 HK-H2 氢气传感器(量程 0~100%LEL), 氨气报警阈值为 25ppm, 氢气为 10%LEL;

紧急切断: 亚德客 VSA-01 电磁阀(响应时间 < 0.5s)串联于燃料管路, 当传感器触发报警时, PLC 立即关闭气源并启动排风系统。

## 2.6 数据采集与控制系统

### 2.6.1 硬件配置

DAQ 模块: 采用研华 USB-4718 数据采集模块(8 通道 AI 输入, 采样率 10kHz), 同步采集温度、压力、流量信号;

控制终端: 信捷 XDM-60 PLC 集成 7 寸触摸屏, 支持 Modbus RTU 协议, 实现远程监控与紧急逻辑控制<sup>[2]</sup>。

### 2.6.2 软件开发

基于 Python 构建数据采集平台, 主要功能包括:

实时数据显示: 动态展示温度、压力、污染物浓度的变化曲线;

数据处理: 对原始数据进行移动平均滤波(窗口宽度 10 点)及热电偶冷端补偿。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

成功搭建低成本掺氨混合燃烧实验台, 总成本 11.11 万元, NO<sub>x</sub> 检测精度满足科研需求;

氨/氢混合燃料在当量比  $\Phi=1.0$  时燃烧稳定性最佳, 火焰传播速度达 22 cm/s, NO<sub>x</sub> 排放峰值为 220ppm;

智能数据采集系统实现多参数同步监测与动态优化, 为后续算法开发提供基础。

### 4.2 展望

未来工作将聚焦于: 集成 TDLAS(可调谐激光吸收光谱)技术, 提升 NH<sub>3</sub> 逃逸检测分辨率至  $\pm 1$ ppm; 开发基于机器学习的燃烧控制算法, 实时优化燃料比例与当量比; 联合本地企业开展工业锅炉中试, 验证实验台在规模化应用中的可行性。

### 参考文献

- [1] 李华, 王强. 氨氢混合燃料燃烧特性研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(3): 45-52.
- [2] GB/T 16157-1996, 固定污染源排气中颗粒物的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [3] 杨浩杰, 刘春雨. 低旋流配置对氨-甲烷-空气预混旋流火焰稳定性和排放特性. 化工学报. 2024-12-31.